

## 15kW 級 DC アークジェットのカソード性能比較

○木下 昌洋<sup>1</sup>, 杵淵紀世志<sup>2</sup>, 中田大将<sup>3</sup>, 細田聡史<sup>2</sup>, 國中均<sup>2</sup>

1: 東大・院, 2: JAXA, 3: 室蘭工大

Key Words : electric propulsion, DC arcjet

## 1. はじめに

国際宇宙探査共同グループ (ISECG) などを中心に, 将来の国際有人ミッションの検討が行われている. このようなミッションにおいては, 輸送効率の観点から, 軌道間での輸送システム技術が必要となる. このような技術の実現のため, 大推力かつ高比推力である大型電気推進器が有力な候補としてあげられる. 欧米では, 数十 kW 級の大型電気推進に関し技術獲得に向けた研究開発が行われている. 日本においても, 2011 年より大型 In-space propulsion ワークショップが開催されており, All-Japan 体制で研究計画の議論を進めている. この中で, 日本的大型電気推進の開発対象として DC アークジェットが候補の一つにあげられる.

DC/MPD アークジェットは推進効率 30%, 寿命 1000 時間程度が一つの上限として認識されている. ホールスラスタ, イオンエンジンと比較すると低推進効率, 低寿命である. その一方で, 推力密度が大きく消費電力に対する重量が軽いという潜在的なメリットをもつ. このため近年の電源軽量化に従い有意なミッション設計を実現できる局面が増大すると考えられる.

このような趨勢を受け, 現在大電力 DC/MPD アークジェット実現化への研究における指針は推進効率向上, 寿命向上, 軽量化の 3 点に集約される. 推進効率向上のためには, 推進剤を現在実用化されているヒドラジンから水素やアンモニアなどへの変更や外部磁場の印加により一定の成果を達している. DC アークジェットの寿命は電極, 特にカソードの損耗が主要因である. 損耗の主要因は作動時の高温による蒸発が主であり, これまで低仕事関数材料の導入やホローカソードの使用により一定の成果を達している. しかし, カソードへの入熱条件とカソード損耗を関連付け, 低損耗カソードの設計指針

を示した研究は少ない. このため, 本研究ではカソード先端温度と作動性能の比較を大目標とし, 研究を行う.

本研究では, この前段階として, 15kW 級水冷式 DC アークジェットに関し, カソードにトリウム 2%入りタングステン及びランタン 2%入りタングステンを使用した際の作動特性及び損耗率の測定を行った.

## 2. 実験装置

### 2.1 15kW 級 DC アークジェットスラスタ

図 1 に本研究で製作した 15kW 級アークジェットの断面図を示す. 主たる構成要素は陽極, 陰極および主放電部以外を絶縁する二種類のインシュレータ, そしてボディ部である. 陽極は銅製で, SUS 製のキャップにより, 同じく SUS 製のボディ部にネジ接合される. 陰極はトリウム 2%タングステン (トリタン) またはランタン 2%入りタングステンを使用し, 銅製のカソードホルダーと根元部でろう接合してある. 陽極・陰極共に水冷方式である. インシュレータは下流側が BN 製, 上流側はマコール製である. 推進剤は軸方向に対し斜めに導入する. 各部の気密にはカーボンシートを使用してある. 本モデルは熱設計のための基礎データ取得を目的としており, 現段階では重量の最適化はなされていない.

図 2 に両電極間の構成を示す. 陽極コンストリクタ部形状は直径 2mm, 長さ 4mm の円柱状である. ノズル出口直径は 22mm, 角度は 64.1 度. ノズル出口のコンストリクタ部に対する開口比は 121 である. 電極間距離はカソードホルダー一部を前後にスライドさせることで調節が可能となっている. 陰極と陽極が接するところから 2mm 引いた位置に設定している.

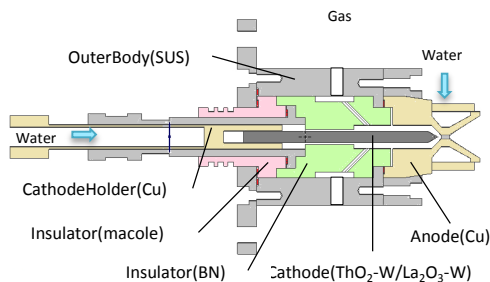


図 1. 15kW 級 DC アークジェット構成

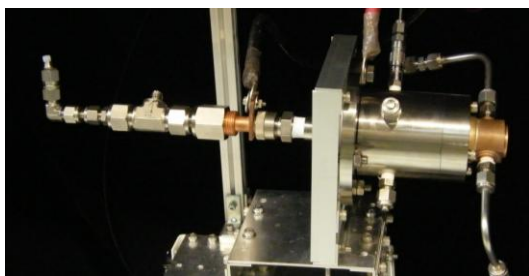


図 2. 15kW 級 DC アークジェット写真

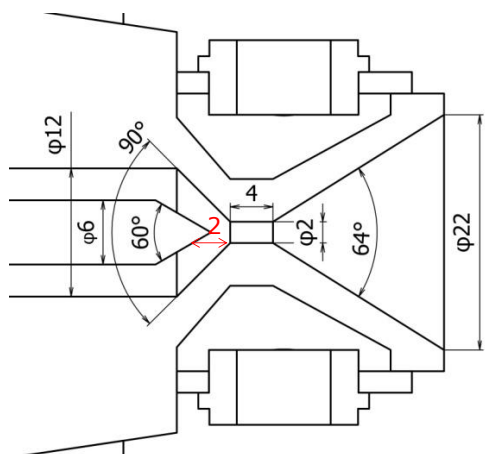


図 2. 電極構成



図 3. カソード写真.

カソードは根元部において銅製のカソードホルダーとろう付けしてある。

## 2.2 実験装置

図 4 に実験装置概略図を示す。使用した真空チャンバーの大きさは長さ 2m, 直径 1m である。チャンバーの排気は数百 Pa まではロータリーポンプを, 数 Pa まではメカニカルブース

ターポンプを用いて行う。チャンバー内圧力はピラニ真空系を用い測定し、アークジェット作動時の背圧は 55Pa 程度に保つよう排気を行う。アークジェットへの電力供給には直流電源装置を用いる。その外観を図 5 に示す。直流電源装置は高電流・低電圧タイプ (300V/70A) のものを使用している。推進剤には窒素を用い、その流量制御にはマスフローコントローラを用いる。

推力測定には LED 変位計を用いる。図 5 のように、スラスタを板バネ支持の架台に設置し推力発生に伴う変位を計測する。

カソード損耗率に関しては、作動前後の質量を電子天秤(メトラー・トレド社, AB304-S)にて計測する。

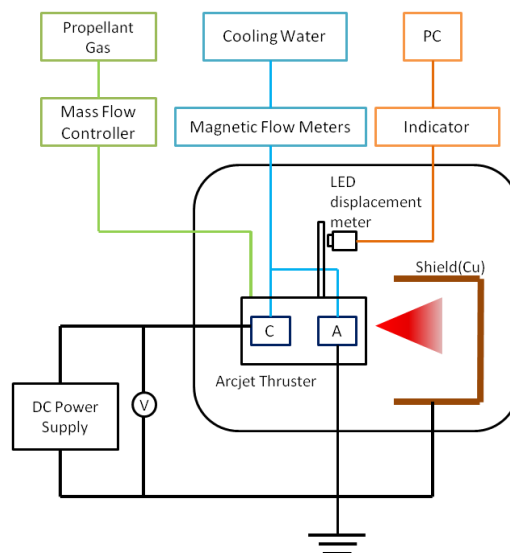


図 4. 実験装置概略図



図 5. スラストスタンド

### 3. 実験結果

#### 3.1 実験条件

表 1 に実験条件を示す。

放電電流は 25~285A とし、着火範囲においてのみ測定を行った。推進剤には窒素を使用し、流量は 0.10g/s とした。

表 1. 実験条件

放電電流 [A]	25~285
推進剤	N <sub>2</sub>
推進剤流量 [g/s]	0.10
電極間距離 [mm]	2
作動時背圧 [Pa]	55

#### 3.2 放電電圧

図 6 に放電電流に対する放電電圧の依存性を示す。図 6 より、トリタン・ランタン共に放電電流の増加に伴い放電電圧が降下するという垂下特性を示している。また、150A 以上の放電電流においては、トリタン・ランタン共に放電電圧はほぼ変化なく一定である。カソード種による性能差は、数 V 以下程度であり、大きな差は見られない。これは、放電電圧が主として電極間距離に依存するためと考えられる。

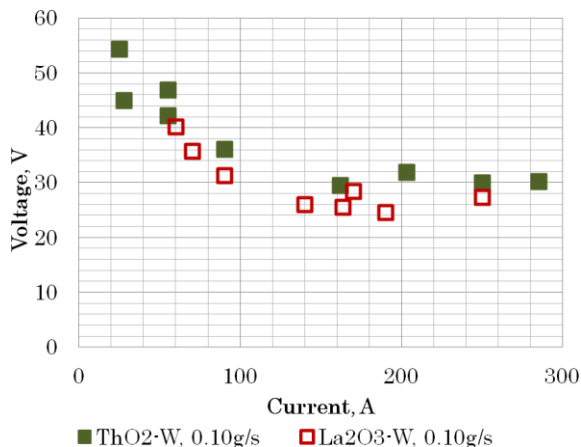


図. 6 放電電流に対する放電電圧の依存性

#### 3.3 投入電力と比推力の関係

比推力は、スラストスタンドより実測した推力値から算出した。図 7 に投入電力に対する推力の関係を示す。トリタンにおいて、比推力は最大約 500 秒であり、8kW において達成している。また、比推力は投入電力に対し 8kW 程度までは増加傾向にあり、その後減少している。

一方ランタンにおいては比推力 300 秒程度が最大であり、7kW 程度で達成している。また、比推力は投入電力に対し増加する傾向にあるが、トリタンと比較すると比推力は 100 秒程度小さい。ランタン作動においては比推力の変動が大きく、これはスラストスタンドの熱変形による測定誤差によるものであると考えられる。このため、推力測定系の改善が必要とされる。

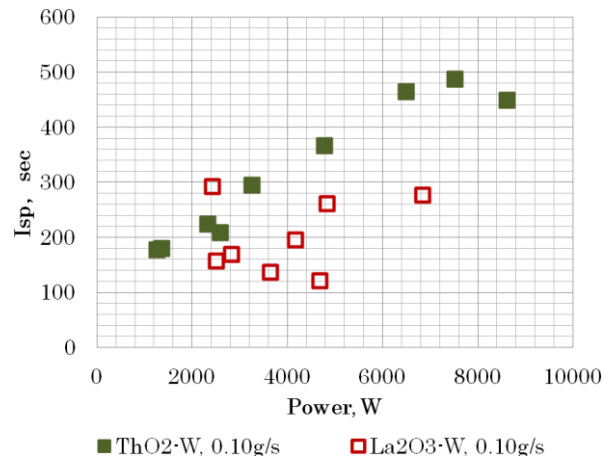


図. 7 投入電力に対する推力の依存性

#### 3.4 損耗率比較

投入電力 172A、作動時間 430 秒前後において、作動前後のカソード質量を測定した。表 2 にその結果を示し、また図 8、図 9 に作動後のトリタン・ランタンカソードの先端を示す。

トリタンについては、カソード質量は作動前後で 30mg 程度増加していた。図 8 より、カソード全体に白い付着が付着し、また先端のごく一部において放電痕が確認できる。一方で、ランタンについては 14mg 程度の減少が見られた。図 9 より、カソード先端部に集中し白い放電痕があることが確認できる。

これにより、定性的にはトリタンの方がランタンに比し損耗が少ないといえる。この要因として、トリタン・ランタンを構成する酸化物ドーパントの融点の差が挙げられる。酸化トリウムの融点が 3050°C であるのに対し、酸化ランタンの融点は 2315°C と低い。このため、ランタンにおいてより優先的に蒸発が起こったと考えられる。

またトリタンにおける質量増加の原因としては、アークジェット点火時の高パルス放電におけるアノードからのスパッタや、カソードホル

ダ一部の質量変化が主な要因であると考えられる。このため、作動損耗のみを抽出できる損耗の測定条件を探ることが求められる。

表 2. カソードの質量損耗

	トリタン	ランタン
放電電流 [A]	172	172
放電電圧 [V]	26.6	27.8
作動時間 [秒]	432	425
質量変化 [mg]	-37.7	13.7



図 8. 作動後のトリタンカソード



図 9. 作動後のランタンカソード

#### 4. まとめ

15kW 級 DC アークジェットに関して、カソードにトリタンとランタンを用いた場合の性能比較、及び損耗率比較を行った。その結果、トリタンとランタンにおいて、放電電流に対する放電電圧はほぼ同程度であった。また、比推力に関してはトリタンの最大約 500 秒に対しランタンは最大約 300 秒であり、トリタンの方が 100 秒程度高い結果となった。

損耗率に関しては、定性的にトリタンの損耗の方がランタンよりも低いという結果を得た。これはトリタンの方が混入酸化剤の融点が高いためであると考えられる。

また、トリタンにおいて作動前後において質量が増加するという現象が発生しており、作動時間の延長など実験条件の改善が必要である。

今後は温度測定系を確立し、作動時のカソード先端温度と損耗率の関係性比較を行う。

#### 参考文献

- 1) M. Takubo, "Thrust Dependence of the 2D-MPD Thruster on the Magnetic Field Applied by the External Coil", ISTS 2011-b-09, 2011
- 2) Dan M. Goebel, "High Current Lanthanum Hexaboride Hollow Cathodes for High Power Hall Thrusters", IEPC-2011-053, 2011
- 3) M. De Tata, "100-hr Endurance Test on a Tungsten Multi-rod Hollow Cathode for MPD Thrusters", IEPC-2011-108, 2011
- 4) E.P. Vaulin, "Application of Hollow Cathode in Arcjet Propulsion at Low and Average Power", IEPC-95-201, 1995
- 5) 中田大将, "15kW 級 DC アークジェットの熱設計について", 宇宙輸送シンポジウム, STEP-2011-006, 2012
- 6) W. J. Harris, "A Study of Cathode Erosion in High Power Arcjets", Texas Tech University, 2002